

## การใช้เศษยางรถยนต์เก่าเป็นวัสดุตัวกลางในชั้นระบายน้ำของระบบชั้นกันซึม Use of Waste Tire Chips as Medium in Drainage Layer of Landfill Liner Systems

ทวีศักดิ์ วังไพศาล<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี จ.อุบลราชธานี

Corresponding author; E-mail address: thaveesak.v@ubu.ac.th

### บทคัดย่อ

ยางรถยนต์เก่าที่ตัดเป็นชิ้นเล็กๆ สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษารูปร่างลักษณะของเศษยางรถยนต์เก่าที่เหมาะสมในการใช้งานเป็นวัสดุตัวกลางในชั้นระบายน้ำของระบบชั้นกันซึม ตัวอย่างที่ใช้มี 3 ลักษณะ คือแบบเส้นแบนกว้าง แบบเส้นแบนแคบ และแบบเป็นก้อน ทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ขณะที่ตัวอย่างถูกกระทำด้วยหน่วยแรงกดทับที่แตกต่างกัน ผลการศึกษาพบว่าเศษยางรถยนต์เก่าทั้ง 3 ลักษณะที่ทดสอบในสภาพที่ไม่ถูกกดทับมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้อยู่ในเกณฑ์ที่สามารถนำไปใช้เป็นวัสดุตัวกลางในชั้นระบายน้ำได้ การกดทับมีผลทำให้ตัวอย่างมีการยุบตัวและมีค่าอัตราส่วนช่องว่างลดลง ส่งผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ลดลง ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของเศษยางรถยนต์เก่าที่อยู่ภายใต้หน่วยแรงกดทับ 80 กิโลปาสกาล มีค่าเท่ากับ  $7.74 \times 10^{-5}$ ,  $3.45 \times 10^{-4}$  และ  $9.95 \times 10^{-4}$  เมตรต่อวินาที สำหรับตัวอย่างแบบเส้นแบนกว้าง แบบเส้นแบนแคบ และแบบเป็นก้อน ตามลำดับ โดยเศษยางรถยนต์เก่าแบบเป็นก้อนจะมีการเสียรูปจากการยุบตัวและมีการเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้จากการกระทำของหน่วยแรงกดทับน้อยที่สุด จึงมีความเหมาะสมในการใช้งานเป็นวัสดุตัวกลางในชั้นระบายน้ำมากกว่าตัวอย่างลักษณะอื่น

คำสำคัญ: ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้, ชั้นระบายน้ำ, ระบบชั้นกันซึม, เศษยางรถยนต์เก่า

### Abstract

Waste tires chips have high potential for many uses. The aim of this study was to investigate the possibility of using waste tire chips as medium in drainage layer of landfill liner systems. Three different shapes of tire chips, which were wide strip, narrow strip and chunk tire chips, were used in this study. Hydraulic conductivity tests were performed for the samples subjected to different confining stresses. It was found that, at no confining stress, the hydraulic conductivity of all 3 shapes of tire chip samples were higher than the recommended value for using as medium in the drainage layer. When subjected to

confining stress, tire chips would be deformed and compressed resulting in the reduction of its void ratio as well as its hydraulic conductivity. The hydraulic conductivity test results of the tire chips subjected to 80 kPa confining stress were  $7.74 \times 10^{-5}$  m/s,  $3.45 \times 10^{-4}$  m/s and  $9.95 \times 10^{-4}$  m/s for the wide strip, narrow strip and crumb tire chip samples, respectively. The least variation of hydraulic conductivity, when subjected to confining stress, was obtained for the chunk tire chip samples, therefore, it is the most preferred for using as medium in drainage layer of liner systems.

Keywords: drainage layer, hydraulic conductivity, landfill liner systems, tire chips

### 1. บทนำ

การเติบโตทางเศรษฐกิจทำให้การผลิตและใช้งานยางรถยนต์จำนวนมาก เมื่อมีอายุใช้งานมากขึ้นยางรถยนต์ก็จะเกิดการสึกหรอและเสื่อมคุณภาพ กลายเป็นยางรถยนต์เก่าที่เป็นของเหลือทิ้ง ในประเทศไทยมีปริมาณการจำหน่ายยางรถยนต์ภายในประเทศในปี 2559 ปริมาณสูงถึง 176 ล้านเส้น [1] ทำให้มียางรถยนต์เก่าที่เป็นของเสียที่เกิดขึ้นในแต่ละปีในปริมาณมากด้วย เนื่องจากยางรถยนต์เป็นวัสดุที่มีความคงทนสูง ทำให้เป็นปัญหาในการกำจัดด้วยวิธีการที่ไม่ก่อให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม

ยางรถยนต์เก่าบางส่วนถูกนำไปใช้งาน ได้แก่ การนำไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ใช้สอย สำหรับใช้ประโยชน์ การนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในอุตสาหกรรมซีเมนต์ อุตสาหกรรมกระดาษ และการผลิตกระแสไฟฟ้า การนำไปทำให้สลายตัวทางความร้อนเพื่อให้ได้น้ำมัน การแปรรูปเป็นยางผงเพื่อนำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์อื่นๆ การนำไปผสมกับยางมะตอยเพื่อใช้ทำถนน เป็นต้น [2] นอกจากนี้ ยังมีการนำยางรถยนต์เก่ามาเป็นวัสดุเสริมกำลังของกำแพงกันดิน การนำยางรถยนต์เก่ามาบดเป็นเป็นชิ้นหรือผงเพื่อเป็นวัสดุทดแทนหรือวัสดุผสมสำหรับงานทาง [3] อย่างไรก็ตาม ยังมียางรถยนต์เก่าที่เหลือเป็นของเสียที่ต้องกำจัดทิ้งอยู่เป็นจำนวนมาก การหาแนวทางการใช้ประโยชน์จากยางรถยนต์เก่าในรูปแบบต่างๆ จะมีส่วนช่วยในการแก้ปัญหาคาจัดการของเสีย ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ต่อสิ่งแวดล้อมและเกิดประโยชน์ทางด้านเศรษฐกิจอีกทางหนึ่งด้วย

ในระบบฝังกลบขยะ มีการนำยางรถยนต์เก่ามาสับหรือย่อยให้เป็นชิ้นเล็ก ๆ แล้วนำไปใช้เป็นส่วนผสมของวัสดุกันซึมโดยมีการนำไปผสมกับดินและปูนซีเมนต์ หรือนำไปผสมกับดินเหนียว แล้วนำไปบดอัดเพื่อใช้เป็นชั้นกันซึม โดยดินและปูนซีเมนต์ หรือดินเหนียวจะทำหน้าที่หลักในการเป็นฉนวนกันการไหลซึมผ่าน ส่วนเศษชิ้นส่วนยางรถยนต์เก่าที่ผสมลงไปมีวัตถุประสงค์เพื่อไปทำหน้าที่ดูดซับสารอินทรีย์คาร์บอนที่ซึมผ่านเข้ามา [4] นอกจากนี้ การใช้เศษยางรถยนต์เก่ายังมีข้อดีในการช่วยลดขยะโลหะหนักออกจากน้ำเสียที่สัมผัสได้ [5]

ในระบบชั้นกันซึมปูพื้นล่างของระบบฝังกลบขยะ (Landfill Liner System) โดยปกติจะมีอยู่ 5 ส่วนเรียงลำดับจากด้านบนลงด้านล่าง [6] คือ ชั้นกรอง ชั้นระบายน้ำ ชั้นป้องกันความเสียหายแก่ชั้นกันซึม ชั้นกันซึม และชั้นรองพื้น สำหรับชั้นระบายน้ำ (Drainage Layer) ซึ่งเป็นชั้นที่ทำหน้าที่ในการรวบรวมและระบายน้ำขยะที่ซึมลงมา เพื่อส่งออกไปยังระบบบำบัดน้ำเสียต่อไปนั้น โดยปกติจะใช้กรวด กรวดหยาบ หิน ตาข่ายธรณี หรือวัสดุอื่นๆ ที่มีความคงทนและสามารถระบายน้ำได้อย่างรวดเร็วและอุดตันได้ยาก คุณสมบัติที่สำคัญของวัสดุในชั้นระบายน้ำคือ จะต้องมีความสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ที่สูง มีความคงทนและรับน้ำหนักได้ดี โดยค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของชั้นระบายน้ำในระบบฝังกลบควรมีค่าสูงกว่า  $1 \times 10^{-4}$  เมตรต่อวินาที [7]

เนื่องจากคุณสมบัติทางกายภาพของยางรถยนต์เก่าที่มีความทนทานต่อการย่อยสลายทั้งเคมีและทางชีวภาพได้ดี และมีความแข็งแรงระดับหนึ่ง จึงมีความเป็นไปได้ที่จะนำยางรถยนต์เก่ามาใช้งานเป็นวัสดุในชั้นระบายน้ำ อย่างไรก็ตาม การที่จะนำยางรถยนต์เก่ามาใช้งานนั้น ต้องมีการแปรสภาพจากยางรถยนต์ที่เป็นวงล้อมาเป็นเศษยางรถยนต์ชิ้นเล็กๆ เสียก่อน จึงจะสามารถใช้เป็นวัสดุระบายน้ำได้ ทั้งนี้ปัจจัยที่อาจมีผลต่อคุณสมบัติในการระบายน้ำของวัสดุคือ ขนาดและรูปร่างของเศษยางรถยนต์ที่ใช้ และเนื่องจากเศษยางรถยนต์เก่ามีคุณสมบัติด้านความยืดหยุ่น จึงอาจเกิดการเสียรูปและหดตัวลงเมื่อถูกกระทำด้วยน้ำหนักกดทับสูงๆ ซึ่งอาจส่งผลให้ความสามารถในการระบายน้ำมีการเปลี่ยนแปลงได้ บทความนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของเศษยางรถยนต์เก่าที่ตัดเป็นชิ้นเล็กๆ เพื่อศึกษาถึงผลของขนาดและลักษณะของเศษยางรถยนต์เก่าต่อความสามารถในการใช้งานเป็นวัสดุตัวกลางในชั้นระบายน้ำของระบบชั้นกันซึมในระบบฝังกลบ

## 2. วัสดุและวิธีการศึกษา

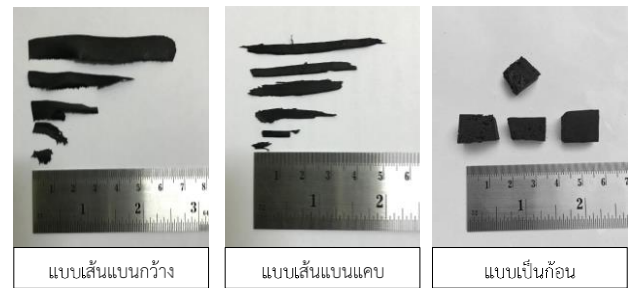
การศึกษานี้เป็นการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของตัวอย่างเศษยางรถยนต์เก่าที่มีขนาดและรูปร่างแตกต่างกัน ทำการทดสอบภายใต้เงื่อนไขที่มีหน่วยแรงกระทำเพื่อจำลองสภาวะที่มีน้ำหนักของขยะหรือวัสดุอื่นที่ก่อกับอยู่ด้านบน โดยค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของวัสดุที่จะเป็นชั้นระบายน้ำในระบบฝังกลบควรมีค่าสูงกว่า  $1 \times 10^{-4}$  เมตรต่อวินาที ตามที่กำหนดในเกณฑ์การออกแบบของ USEPA [7]

### 2.1 วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

เศษยางรถยนต์เก่าที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ได้มาจากวิธีการตัดที่แตกต่างกัน 3 วิธีการโดยใช้เครื่องมือการตัดที่มีความสะดวกและรวดเร็วคือ การตัดด้วยค้อนสับไฟฟ้า การตัดด้วยเลื่อยโซ่ยนต์ และตัดด้วยมีดคัตเตอร์ การตัดทั้ง 3 วิธี จะทำให้ได้ตัวอย่างเศษยางรถยนต์ที่มีลักษณะเป็นเส้นแบนกว้าง เส้นแบนแคบ และเป็นก้อน ตามลำดับ ซึ่งจะใช้เป็นชื่อเรียกตัวอย่างเศษยางรถยนต์เก่าที่ใช้ในบทความนี้ โดยมีขนาดโดยประมาณดังแสดงในตารางที่ 1 และมีรูปร่างดังแสดงในรูปที่ 1 จะเห็นว่าตัวอย่างแบบเส้นแบนกว้างและเส้นแบนแคบจะมีรูปร่างคล้ายคลึงกัน แต่แตกต่างกันเฉพาะขนาด ส่วนตัวอย่างแบบเป็นก้อนจะมีลักษณะที่เทียบเคียงกับหินหรือกรวดหยาบที่ใช้เป็นวัสดุในชั้นระบายน้ำ โดยลักษณะเป็นก้อนมีขนาดที่เทียบได้กับขนาดอนุภาคที่ลอดผ่านตะแกรงเบอร์ 3/4 และค้างบนตะแกรงเบอร์ 3/8

ตารางที่ 1 ชื่อเรียกลักษณะและขนาดของตัวอย่างเศษยางรถยนต์เก่า

ชื่อเรียกลักษณะตัวอย่าง	ขนาด (มิลลิเมตร)			วิธีการตัด
	ความกว้าง	ความยาว	ความหนา	
แบบเส้นแบนกว้าง	5 - 10	10 - 70	< 1	ตัดด้วยค้อนสับไฟฟ้า
แบบเส้นแบนแคบ	3 - 5	5 - 50	< 1	ตัดด้วยเลื่อยโซ่ยนต์
แบบเป็นก้อน	10 - 20	10 - 10	< 5	ตัดด้วยมีดคัตเตอร์



รูปที่ 1 รูปร่างลักษณะของตัวอย่างเศษยางรถยนต์เก่าที่ใช้ในการศึกษา

### 2.2 การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้

การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้อ้างอิงมาตรฐานการทดสอบ ASTM D2434-68 Standard Test Method for Permeability of Granular Soils (Constant Head) ทำการทดสอบโดยให้น้ำไหลผ่านเข้าไปในตัวอย่างจากด้านล่าง (ดังรูปที่ 2) ระบบทดสอบออกแบบให้ควบคุมความแตกต่างของเฮดของน้ำระหว่างทางเข้าและทางออกของตัวอย่างมีค่าคงที่ ( $\Delta H$ ) ทำการตรวจวัดอัตราการไหลของน้ำ ( $Q$ ) ที่ไหลซึมผ่านตัวอย่างที่มีความสูง ( $\Delta L$ ) คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ ( $k$ ) ตามสมการของดาร์ซี ดังแสดงในสมการที่ (1)

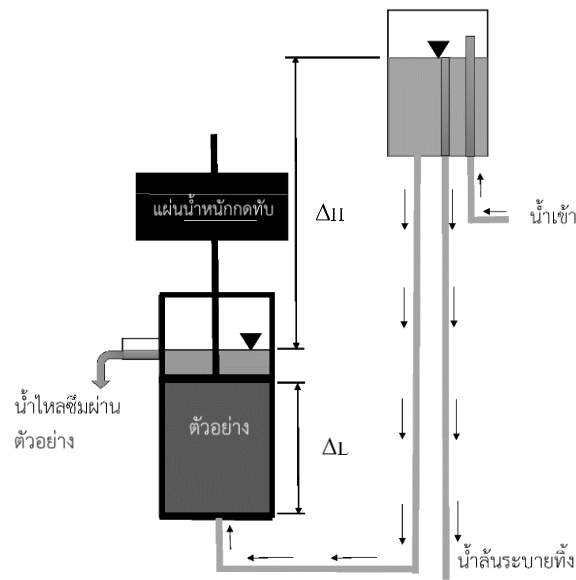
$$k = \frac{Q}{A_i} = \frac{Q}{A \left( \frac{\Delta H}{\Delta L} \right)} \quad (1)$$

เนื่องจากเมื่ออยู่ภายใต้หน่วยแรงกดทับเศษยางรถยนต์เก่าอาจมีการเสียรูปและอัดตัวกันแน่นขึ้นทำให้ช่องว่างระหว่างอนุภาคของเศษยางรถยนต์เก่ามีขนาดลดลงและอาจส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้เปลี่ยนแปลงไป

กระบอกบรรจุตัวอย่างเศษยางรถยนต์สำหรับการทดสอบเป็นท่อพีวีซี ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6 นิ้ว เพื่อให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหน้าตัดไม่น้อยกว่า 8 ถึง 12 เท่า ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตัวอย่างที่ใหญ่ที่สุด กระบอกบรรจุตัวอย่างถูกออกแบบเช่นเดียวกับเครื่องมือทดสอบแบบกดอัดตัวอย่างได้ (ดังรูปที่ 3) มีลักษณะเป็นกระบอกแข็งเช่นเดียวกับกระบอกกดอัดตัวอย่าง ฝาปิดด้านบนเป็นแผ่นเหล็กเจาะรูทั่วทั้งแผ่นและเชื่อมต่อกับก้านสำหรับถ่ายเทแรงเพื่อกดอัดตัวอย่างได้ โดยแผ่นเหล็กนี้มีขนาดเล็กกว่าเส้นผ่าศูนย์กลางภายในของกระบอกบรรจุตัวอย่างเล็กน้อย เพื่อไม่ให้เกิดแรงเสียดทานกับผิวภายในของกระบอกทดสอบ และสามารถถ่ายเทหน่วยแรงกดทับลงไปยังตัวอย่างได้อย่างสมบูรณ์ หน่วยแรงกดทับที่ใช้ในขณะทดสอบมีค่าตั้งแต่ 16 กิโลปาสกาล ถึง 80 กิโลปาสกาล โดยเทียบเท่ากับน้ำหนักของขยะที่กบฏอยู่ด้านบนที่ความหนาต่างๆ กันตั้งแต่ 2 เมตร ถึง 10 เมตร ดังรายละเอียดในตารางที่ 2 โดยเทียบจากความหนาแน่นของขยะชุมชนทั่วไปที่มีความหนาแน่นเท่ากับ 500 ถึง 800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร [8] ในการทดสอบนี้ใช้ความหนาแน่นสูงสุดในการประเมินหน่วยแรงกดทับคือ 800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร



รูปที่ 3 การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของเศษยางรถยนต์เก่าที่มีหน่วยแรงกดทับในขณะทดสอบ



รูปที่ 2 ผังระบบทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้

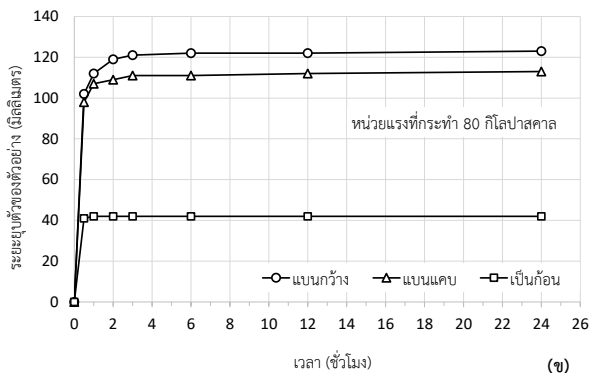
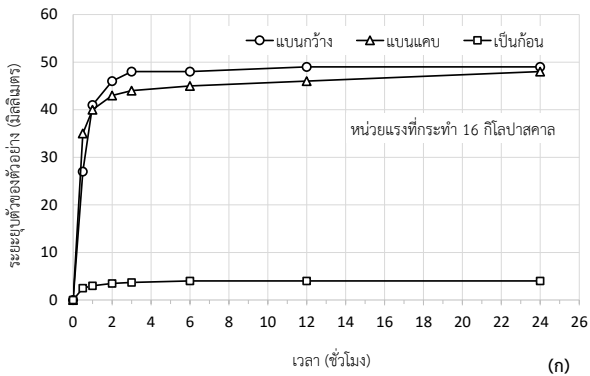
การเตรียมตัวอย่างและการติดตั้งก่อนทดสอบทำได้โดย นำตัวอย่างมาซึ่งน้ำหนักแล้วนำมาแช่น้ำไว้ 24 ชั่วโมง เพื่อให้ผิวของตัวอย่างเศษยางรถยนต์เก่าดูดซับน้ำอย่างทั่วถึงและอิมตัวด้วยน้ำ จากนั้นจึงบรรจุตัวอย่างลงไปใกระบอกทดสอบและเกลี่ยชั้นตัวอย่างให้สม่ำเสมอแล้วปิดทับด้วยแผ่นเหล็กเจาะรู ปล่อยให้ น้ำไหลเข้าไปในกระบอกทดสอบแล้วเคาะไล่ฟองอากาศที่อาจค้างอยู่ภายใน การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ในกรณีที่ไม่มีจารณาหน่วยแรงกดทับจากน้ำหนักของขยะ สามารถเริ่มทำการทดสอบได้ทันที ส่วนการทดสอบเพื่อจำลองสภาวะที่ตัวกลางในชั้นระบายน้ำถูกกดทับจากน้ำหนักของขยะและวัสดุอื่นๆ ที่กบฏอยู่ด้านบนนั้น มีขั้นตอนเพิ่มขึ้นคือ หลังจากบรรจุตัวอย่างลงในกระบอกทดสอบและปิดทับด้วยแผ่นเหล็กเจาะรูแล้ว จะทำการกดทับตัวอย่างด้วยหน่วยแรงตามที่ต้องการก่อน และจะเริ่มทดสอบการไหลซึมผ่านหลังจากการยุบตัวของตัวอย่างในกระบอกหยุดนิ่งแล้ว จากการทดสอบเบื้องต้นพบว่า การยุบตัวของตัวอย่างเศษยางรถยนต์เก่าที่ทดสอบจะเกิดขึ้นมากในช่วง 2 ถึง 3 ชั่วโมงแรกเท่านั้น ดังผลการทดสอบในรูปที่ 4 ดังนั้นในการศึกษานี้จึงกำหนดให้เริ่มทำการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้หลังจากที่ทำการกดทับตัวอย่างค้างไว้แล้วไม่น้อยกว่า 3 ชั่วโมง

ตารางที่ 2 หน่วยแรงกดทับที่ใช้ในขณะทดสอบที่เทียบเท่ากับน้ำหนักของชั้นขยะที่มีความหนาต่างๆ

ความหนาของชั้นขยะ (เมตร)	หน่วยแรงกดทับที่ใช้ในการทดสอบ (กิโลปาสกาล)
2	16

4	32
6	47
8	63
10	80

หมายเหตุ พื้นที่หน้าตัดของกระบอกตัวอย่างเท่ากับ 0.018 ตารางเมตร  
ความหนาแน่นของขยะเท่ากับ 800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร



รูปที่ 4 ค่าการยวบตัวของตัวอย่างตามระยะเวลาเมื่อถูกกดทับด้วยหน่วยแรง (ก) 16 กิโลปาสคาล และ (ข) 80 กิโลปาสคาล

### 3. ผลการศึกษาและการวิเคราะห์ผล

การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของตัวอย่างเศษยางรถยนต์เก่าที่มีขนาดและรูปร่างแตกต่างกัน 3 ลักษณะประกอบด้วย การทดสอบในสภาวะที่ไม่มีหน่วยแรงกดทับ เพื่อใช้เป็นค่าอ้างอิงคุณสมบัติเบื้องต้น และการทดสอบในกรณีที่กำลังสภาวะการใช้งานเป็นวัสดุในชั้นระบายน้ำที่เศษยางรถยนต์เก่าอยู่ภายใต้หน่วยแรงกดทับ โดยมีรายละเอียดดังนี้

#### 3.1 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของตัวอย่างเศษยางรถยนต์เก่า

จากการทดสอบคุณสมบัติของตัวอย่างทั้ง 3 ลักษณะที่ทำการศึกษาพบว่า เศษยางรถยนต์เก่ามีความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 1.13 และผลการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้โดยใช้วิธีทดสอบแบบแรงดันคงที่พบว่า ตัวอย่างเศษยางรถยนต์ที่มีลักษณะเป็นเส้นแบนกว้าง เส้นแบนแคบ และเป็นก้อน ที่อยู่ในสภาวะที่ไม่มีหน่วยแรงกดทับด้านบนมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้เท่ากับ  $6.83 \times 10^{-4}$  เมตรต่อวินาที  $1.37 \times 10^{-3}$  เมตรต่อวินาที และ  $1.35 \times 10^{-3}$  เมตรต่อวินาที ตามลำดับ จะเห็นว่า ตัวอย่างแบบเส้น

แบนกว้างมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ต่ำกว่าตัวอย่างแบบเส้นแบนแคบ และแบบเป็นก้อน โดยมีค่าต่ำกว่าประมาณ 2 เท่า และตัวอย่างแบบเส้นแบนแคบและแบบเป็นก้อนมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ใกล้เคียงกัน หากเปรียบเทียบกับข้อกำหนดในการใช้งานเป็นวัสดุระบายน้ำในระบบชั้นกันซึมของ USEPA จะเห็นว่า ตัวอย่างทั้ง 3 ลักษณะมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้สูงกว่า  $1 \times 10^{-4}$  เมตรต่อวินาที มีคุณสมบัติเบื้องต้นอยู่ในเกณฑ์ที่สามารถใช้เป็นวัสดุระบายน้ำได้ ส่วนปัจจัยที่ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของตัวอย่างแต่ละลักษณะแตกต่างกันจะได้อธิบายในหัวข้อถัดไป

#### 3.2 การยวบตัวของตัวอย่างเมื่อถูกแรงกดทับ

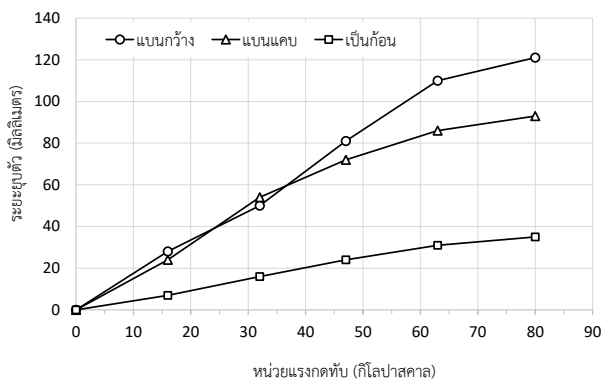
จากการทดสอบเบื้องต้น พบว่าตัวอย่างเศษยางรถยนต์เก่าทั้ง 3 ลักษณะมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้สูงเพียงพอตามค่าที่กำหนด อย่างไรก็ตาม เนื่องจากเศษยางรถยนต์เก่าเป็นวัสดุที่มีความยืดหยุ่น เมื่ออยู่ในสภาวะการใช้งานเป็นวัสดุในชั้นระบายน้ำจะมีน้ำหนักกดทับจากขยะที่ฝังกลบและวัสดุที่ปิดกลบอยู่ด้านบนกระถางลงมา จึงอาจมีการหดตัว และเสียรูป ทำให้ช่องว่างระหว่างอนุภาคของวัสดุที่เป็นเส้นทางการไหลซึมผ่านของน้ำเปลี่ยนแปลงไปได้ จึงจำเป็นต้องทำการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติดังกล่าว

การทดสอบการยวบตัวของตัวอย่างเศษยางรถยนต์เก่าทำได้โดย ชั่งน้ำหนักตัวอย่างตามที่กำหนดแล้วบรรจุลงในกระบอกทดสอบ จากนั้นทำการกดทับตัวอย่างด้วยหน่วยแรงขนาด 16, 32, 47, 63 และ 80 กิโลปาสคาล ซึ่งเป็นหน่วยแรงที่เทียบเท่ากับน้ำหนักที่กดทับลงมาของชั้นขยะที่มีความหนา 2, 4, 6, 8 และ 10 เมตร ตามลำดับ แล้วทำการตรวจวัดระยะการยวบตัวในแนวตั้งของตัวอย่างที่เกิดขึ้น รูปที่ 5 แสดงค่าการยวบตัวที่ตรวจวัดได้ของตัวอย่างเศษยางรถยนต์เก่าที่ถูกกดทับด้วยหน่วยแรงต่างๆ กัน จะเห็นว่า ตัวอย่างทั้ง 3 ลักษณะจะมีระยะยวบตัวมากขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของหน่วยแรงที่กดทับ โดยตัวอย่างแบบเส้นแบนกว้างมีระยะยวบตัวมากที่สุดและตัวอย่างแบบเป็นก้อนมีระยะยวบตัวน้อยที่สุด

หากพิจารณาถึงอัตราการยวบตัวต่อหน่วยแรงที่กระทำ จะเห็นว่า อัตราการยวบตัวของตัวอย่างแบบเส้นแบนกว้างจะมีค่ามากที่สุดและอัตราการยวบตัวของตัวอย่างแบบเป็นก้อนจะมีค่าน้อยที่สุด โดยเพิ่มขึ้นของหน่วยแรงกดทับจากศูนย์ขึ้นไปจนถึง 80 กิโลปาสคาล ทำให้ตัวอย่างแบบเส้นแบนกว้างมีการยวบตัวลงมาได้ถึง 120 มิลลิเมตร คิดเป็นค่าการยวบตัวร้อยละ 35 ในขณะที่ตัวอย่างแบบเป็นก้อนมีการยวบตัวลงมาเพียง 35 มิลลิเมตรเท่านั้น คิดเป็นค่าการยวบตัวร้อยละ 12 อธิบายได้ว่า การที่ตัวอย่างแบบเป็นก้อนมีค่าการยวบตัวน้อยเนื่องจากตัวอย่างที่เป็นก้อนแต่ละชิ้นมีรูปร่างที่เป็นก้อนที่มีความหนาแน่นมากเมื่อเทียบกับตัวอย่างแบบเป็นเส้นแบน จึงมีความแข็งแรงสามารถรับแรงได้ดี ปริมาณการยวบหรือหดตัวของตัวอย่างแต่ละชิ้นเกิดขึ้นน้อย ค่าการยวบตัวที่ตรวจวัดได้จึงต่ำ ในขณะที่ตัวอย่างแบบเป็นเส้นมีลักษณะเป็นแผ่น แบนๆ ยาวๆ จึงมีความแข็งแรงน้อยและยืดหยุ่นได้มาก และการที่มีขนาดชิ้นที่เล็กจึงทำให้มีจำนวนช่องว่างขนาดเล็กระหว่างชิ้นตัวอย่างจำนวนมากกระจายตัวกันอยู่ ลักษณะเส้นที่ยาวทำให้เกิดการเกาะเกี่ยวกันไปมาได้ง่าย ทำให้การเรียงตัวในขณะที่ไม่มีความแรงกดทับจึงอยู่ในสภาพที่หลวม มีช่องว่างจำนวนมาก เมื่อถูกกดทับช่องว่างจำนวนมาก

เหล่านี้จะถูกบีบตัวลง ขึ้นตัวอย่างแต่ละชั้นสามารถยืดหยุ่นเปลี่ยนรูปได้ง่าย จึงทำให้อัตราการยุบตัวที่สูง

นอกจากนั้น การยุบตัวของตัวอย่างแบบเส้นแบนกว้างและตัวอย่างแบบเส้นแบนแคบจะมีค่าใกล้เคียงกันที่หน่วยแรงกดทับต่ำกว่าประมาณ 40 กิโลปาสคาล และมีค่าแตกต่างกันมากขึ้นที่หน่วยแรงที่สูงขึ้น โดยตัวอย่างแบบเส้นแบนกว้างจะมีการยุบตัวมากกว่าตัวอย่างแบบเส้นแบนแคบ แสดงให้เห็นถึงผลของความแตกต่างด้านขนาดของชั้นตัวอย่าง กล่าวคือตัวอย่างแบบเส้นแบนกว้างซึ่งมีขนาดของความยาวและความกว้างของชั้นตัวอย่างมากกว่าตัวอย่างแบบเส้นแบนแคบ จึงมีการเกาะเกี่ยวและสัมผัสกันระหว่างชั้นตัวอย่างได้มากกว่าตัวอย่างที่มีเส้นสั้นและแคบ ที่หน่วยแรงกดทับต่ำชั้นตัวอย่างยังมีความแข็งแรงในการต้านทานการเสียรูปได้ จึงยังคงมีช่องว่างระหว่างชั้นตัวอย่างคงเหลืออยู่มาก แต่เมื่อหน่วยแรงกดทับมีค่าสูงถึงระดับหนึ่งจึงทำให้เกิดการยึดหรือยับตัวของชั้นตัวอย่างแบบเส้นแบนกว้างต่อไปได้อีก มีการเสียรูปและจัดเรียงตัวที่แน่นขึ้นไปอีกจึงมีการยุบตัวสูงขึ้นได้



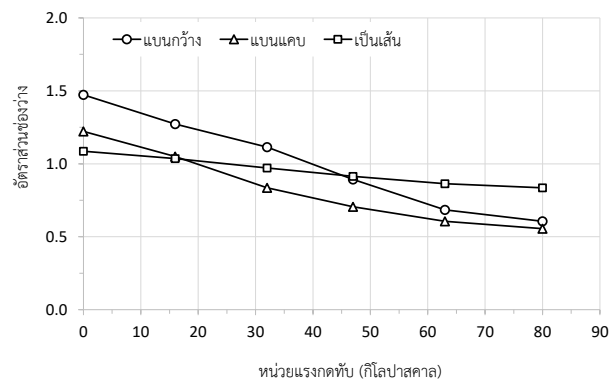
รูปที่ 5 ระยะยุบตัวของตัวอย่างที่ถูกกระทำด้วยหน่วยแรงกดทับแตกต่างกัน

หากพิจารณาผลของหน่วยแรงกดทับที่กระทำต่อตัวอย่างเศษยางรถยนต์เก่าในรูปของอัตราส่วนช่องว่าง (Void Ratio) จะมีความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนช่องว่างกับหน่วยแรงกดทับที่กระทำกับตัวอย่างดังแสดงในรูปที่ 6 โดยอัตราส่วนช่องว่างของตัวอย่างมีค่าลดลงเมื่อถูกกดทับด้วยหน่วยแรงที่สูงขึ้น การเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนช่องว่างเป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรช่องว่างในตัวอย่างที่ทดสอบ ซึ่งผลทดสอบที่ได้สำหรับตัวอย่างแต่ละลักษณะนั้น มีความสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงของผลการทดสอบการยุบตัวของตัวอย่างที่ถูกกระทำด้วยหน่วยแรงกดทับข้างต้น

โดยในขณะที่ไม่ถูกกดทับ (หน่วยแรงกดทับเป็นศูนย์) ตัวอย่างแบบเส้นแบนกว้างมีอัตราส่วนช่องว่างสูงที่สุดและตัวอย่างแบบเป็นก้อนมีอัตราส่วนช่องว่างต่ำที่สุด อัตราส่วนช่องว่างของตัวอย่างแบบเส้นแบนกว้างมีค่าสูงเนื่องจากชั้นตัวอย่างมีลักษณะเป็นเส้นยาวและแบน จึงเกิดการเกาะเกี่ยวพันกันได้ง่าย การเรียงตัวกันอย่างหลวมๆ ในสภาวะที่ไม่ถูกกดทับจึงยังคงมีช่องว่างขนาดเล็กกระหว่างอนุภาคกระจายอยู่ในตัวอย่างจำนวนมาก ทำให้มีปริมาตรรวมของช่องว่างมาก ในขณะที่ตัวอย่างแบบเป็นก้อน

ถึงแม้ว่าช่องว่างระหว่างชั้นตัวอย่างจะมีขนาดใหญ่เห็นได้ชัดเจน แต่ก็มีจำนวนของช่องว่างน้อย ปริมาตรรวมของช่องว่างต่อปริมาตรของส่วนที่เป็นเนื้อวัสดุจึงต่ำ อัตราส่วนช่องว่างของตัวอย่างแบบเส้นแบนแคบมีค่าต่ำกว่าตัวอย่างแบบเส้นแบนกว้างเนื่องจากตัวอย่างแบบเส้นแบนแคบมีขนาดของชั้นตัวอย่างเล็กกว่า การเกาะเกี่ยวพันกันจึงน้อยกว่า จึงมีปริมาตรรวมของช่องว่างน้อยกว่า

นอกจากนั้น การเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนช่องว่างของตัวอย่างแบบเส้นแบนกว้างและแบบเส้นแบนแคบจะมีช่วงที่ใกล้เคียงกันคือ มีค่าอยู่ระหว่าง 0.61 – 1.47 คิดเป็นการเปลี่ยนแปลงร้อยละ 58.5 และมีค่าอยู่ระหว่าง 0.56 – 1.22 คิดเป็นการเปลี่ยนแปลงร้อยละ 54.1 สำหรับตัวอย่างแบบเส้นแบนกว้างและแบบเส้นแบนแคบ ตามลำดับ ส่วนการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนช่องว่างของตัวอย่างแบบเป็นก้อนจะอยู่ในช่วงแคบๆ เท่านั้นคือมีค่าอยู่ระหว่าง 0.84 – 1.09 คิดเป็นการเปลี่ยนแปลงร้อยละ 22.9 ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงทำให้อัตราส่วนช่องว่างของตัวอย่างแบบเป็นก้อนที่มีค่าต่ำกว่าตัวอย่างที่เป็นเส้นแบนในช่วงที่ไม่มีหน่วยแรงกดทับกลับมามีค่าที่สูงกว่าอัตราส่วนช่องว่างของตัวอย่างที่เป็นเส้นแบนในช่วงที่มีหน่วยแรงกดทับสูงๆ ทั้งนี้ เป็นผลมาจากความแตกต่างของลักษณะชั้นตัวอย่างที่ได้กล่าวไปแล้วในช่วงต้น



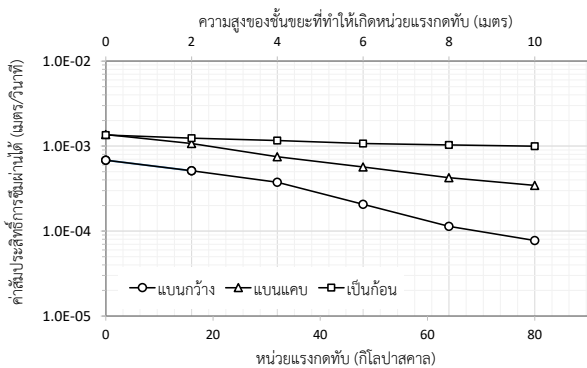
รูปที่ 6 การเปลี่ยนแปลงของค่าอัตราส่วนช่องว่างตามขนาดของหน่วยแรงกดทับที่กระทำกับตัวอย่าง

### 3.3 ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้เมื่อถูกแรงกดทับ

การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของตัวอย่างเศษยางรถยนต์เก่าภายใต้หน่วยแรงกดทับเป็นการจำลองสภาวะที่วัสดุตัวกลางในชั้นระบายจะต้องแบกรับน้ำหนักจากขยะและวัสดุกลบทับอื่นๆ ที่อยู่ด้านบน โดยหน่วยแรงกดทับที่กระทำลงมาจะผันแปรไปตามความหนาหรือความสูงของชั้นขยะที่กลบทับอยู่ด้านบน จากการทดสอบโดยการผันแปรหน่วยแรงกดทับที่เทียบเท่ากับน้ำหนักของขยะที่มีความหนาตั้งแต่ 2 เมตร ถึง 10 เมตร ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 7 จะเห็นว่า ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของตัวอย่างเศษยางรถยนต์เก่าทั้ง 3 ลักษณะมีแนวโน้มลดลงเมื่อหน่วยแรงกดทับมีค่ามากขึ้น โดยตัวอย่างแบบเป็นก้อนมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้สูงที่สุด และตัวอย่างแบบเส้นแบนกว้างมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ต่ำที่สุด

สำหรับช่วงของหน่วยแรงกดทับที่ทดสอบ จะได้ว่าตัวอย่างแบบเส้นแบนกว้างมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ลดลงจาก  $6.83 \times 10^{-4}$  เมตรต่อวินาที เป็น  $7.74 \times 10^{-5}$  เมตรต่อวินาที มีค่าลดลงมากที่สุดคิดเป็นร้อยละ 88.7 ตัวอย่างแบบเส้นแบนแคบมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ลดลงจาก  $1.37 \times 10^{-3}$  เมตรต่อวินาที เป็น  $3.45 \times 10^{-4}$  เมตรต่อวินาที มีค่าลดลงคิดเป็นร้อยละ 74.8 ซึ่งมีอัตราการลดลงต่ำกว่าตัวอย่างแบบเส้นแบนกว้างเล็กน้อย ส่วนตัวอย่างแบบเป็นก้อนมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ลดลงจาก  $1.35 \times 10^{-3}$  เมตรต่อวินาที เป็น  $9.95 \times 10^{-4}$  เมตรต่อวินาที มีค่าลดลงคิดเป็นร้อยละ 26.3 ซึ่งมีอัตราการลดลงค่อนข้างน้อย หรืออาจกล่าวได้ว่าตัวอย่างแบบเป็นก้อนมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ค่อนข้างคงที่

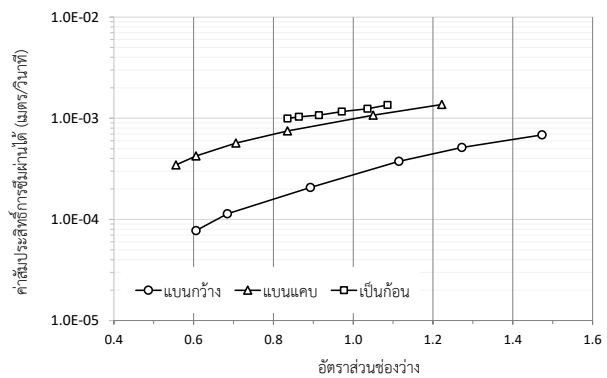
ทั้งนี้สามารถอธิบายได้ว่า ด้วยคุณสมบัติของยางรถยนต์ที่มีความยืดหยุ่น เมื่อถูกแรงกระทำหรือมีน้ำหนักกดทับอาจเกิดการเสียรูป หดตัว เล็กกลง และมีการเรียงตัวของอนุภาคหรือชิ้นตัวอย่างที่แนบสนิทกันมากขึ้น ทำให้ช่องว่างระหว่างอนุภาคที่เป็นเส้นทางในการไหลซึมผ่านของน้ำลดลง ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้จึงมีค่าลดลงไปด้วย การที่ตัวอย่างเศษยางรถยนต์เก่ามีขนาดและรูปร่างที่แตกต่างกัน จึงมีความสามารถในการรับแรงแตกต่างกัน และการเปลี่ยนแปลงของช่องว่างในตัวอย่างที่เป็นผลจากการกระทำของหน่วยแรงกดทับจึงแตกต่างกันดังที่กล่าวไปแล้ว และส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ในทิศทางที่เป็นเหตุเป็นผลสอดคล้องกัน



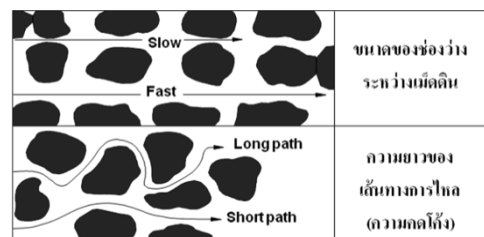
รูปที่ 7 การเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของตัวอย่างเศษยางรถยนต์เก่าที่ถูกกระทำด้วยหน่วยแรงกดทับ

การเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของตัวอย่างเศษยางรถยนต์เก่าที่ทดสอบสามารถแสดงในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้กับอัตราส่วนช่องว่างได้ดังรูปที่ 8 จะเห็นแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ตามการเปลี่ยนแปลงของค่าอัตราส่วนช่องว่างของตัวอย่าง โดยตัวอย่างที่มีอัตราส่วนช่องว่างสูงจะมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้จะสูงขึ้นไปด้วย นอกจากนี้จะเห็นว่าที่อัตราส่วนช่องว่างที่เท่ากัน ตัวอย่างแบบเป็นก้อนจะมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้สูงกว่าตัวอย่างแบบเส้นแบน เนื่องจากการเรียงตัวของชิ้นตัวอย่างที่เป็นก้อนๆ นั้นไม่มีความซับซ้อน ช่องว่างที่เป็นเส้นทางในการไหลซึมผ่านของน้ำในตัวอย่างแบบเป็นก้อนนั้นจะเป็นช่องว่างที่มีความต่อเนื่องกัน ช่องว่างแต่ละช่องมีขนาดใหญ่และจำนวนไม่มาก ทำให้เส้นทางในการไหลของน้ำไม่

คดเคี้ยวมาก การไหลซึมผ่านของน้ำจึงเป็นไปได้โดยสะดวก ในทางตรงกันข้ามตัวอย่างที่เป็นเส้นแบนนั้นมึลักษณะแบนและยาว มีชิ้นวัสดุหลากหลายขนาด ทำให้การจัดเรียงตัวของวัสดุจะมีความซับซ้อน เกาะเกี่ยวพันกัน วัสดุชิ้นเล็กสามารถเข้าไปแทรกอยู่ตามช่องว่างระหว่างวัสดุชิ้นที่ใหญ่กว่าได้ ช่องว่างที่เป็นเส้นทางในการไหลซึมผ่านของน้ำแต่ละช่องจึงมีขนาดเล็กกระจายไปทั่ว เส้นทางในการไหลของน้ำจึงมีความคดเคี้ยวมาก ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้จึงต่ำลง ดังนั้น ถึงแม้ว่าค่าอัตราส่วนช่องว่างของตัวอย่างจะมีค่าเท่ากัน แต่ลักษณะของช่องว่างที่มีความแตกต่างกันในด้านขนาดและความซับซ้อนก็ส่งผลให้มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ที่แตกต่างกันได้ดังแนวคิดที่แสดงในรูปที่ 9 ขนาดของช่องว่างที่เป็นเส้นทางในการไหลซึมผ่านที่มีขนาดเล็กจะทำให้การไหลซึมผ่านได้ช้า และการเรียงตัวของตัวกลางที่ทำให้ซับซ้อนทำให้เส้นทางในการไหลมีความคดเคี้ยวมากขึ้น การไหลซึมผ่านจะช้าลง



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้กับอัตราส่วนช่องว่างของตัวอย่างที่มีลักษณะแตกต่างกัน



รูปที่ 9 แนวคิดเกี่ยวกับผลของขนาดช่องว่างและความคดเคี้ยวของเส้นทางในการไหลที่มีต่อค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ (ดัดแปลงจาก [9])

หากเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ในสภาวะที่ตัวอย่างถูกกดทับกับข้อกำหนดในการใช้งานเป็นวัสดุระบายน้ำในระบบชั้นกันซึม โดยจะต้องมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้สูงกว่า  $1 \times 10^{-4}$  เมตรต่อวินาที จะเห็นว่าตัวอย่างแบบเส้นแบนกว้างที่ถูกกดทับด้วยหน่วยแรงตั้งแต่ประมาณ 65 กิโลปาสคาลขึ้นไป หรือคิดเป็นน้ำหนักจากชั้นขยะที่มีความสูงตั้งแต่ 8 เมตรขึ้นไป จะมีคุณสมบัติไม่ผ่านเกณฑ์การใช้งานเป็นวัสดุในชั้นระบายน้ำ ดังนั้น เศษยางรถยนต์เก่าที่มีคุณสมบัติเหมาะสมที่จะใช้เป็นวัสดุตัวกลางในชั้นระบายน้ำในระบบชั้นกันซึมของระบบฝังกลบขยะที่มีความสูงของชั้นขยะอยู่ในช่วงที่ทำการทดสอบในครั้งนี้คือ ตัวอย่างแบบเป็นก้อนและแบบ

เส้นแบนแคบ อย่างไรก็ตาม หากชั้นขยะมีความสูงมากขึ้นจำเป็นต้องมีการตรวจสอบค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้เพิ่มเติม โดยเฉพาะในกรณีของตัวอย่างแบบเส้นแบนแคบซึ่งยังคงมีความผันแปรของค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้สูง และควรมีการศึกษาถึงผลของปัจจัยที่อาจทำให้ความสามารถในการระบายน้ำของวัสดุดังกล่าวเปลี่ยนแปลงไปในระยะระยะยาวด้วย เช่น การอัดตันภายในชั้นระบายน้ำ เป็นต้น

ข้อเสนอแนะที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้คือ เศษยางรถยนต์เก่าที่ใช้เป็นวัสดุตัวกลางในชั้นระบายน้ำควรมีลักษณะรูปร่างที่เป็นก้อน เนื่องจากจะมีความแข็งแรง สามารถต้านทานการเสียดสีและการหดตัวเมื่อถูกแรงกระทำได้ดีกว่าตัวกลางที่มีลักษณะเป็นเส้นยาว จะทำให้ชั้นระบายน้ำมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ที่ค่อนข้างคงที่ ไม่ผันแปรไปตามน้ำหนักกดทับจากชั้นขยะที่เพิ่มขึ้นตามอายุการใช้งานของระบบฝังกลบขยะ ขนาดของก้อนเศษยางรถยนต์ที่จะนำมาใช้งานจะผันแปรไปตามกระบวนการผลิต การใช้เศษยางรถยนต์ก้อนที่มีขนาดก้อนใหญ่จะมีข้อดีในด้านความสามารถในการระบายน้ำได้ดีกว่าเศษยางรถยนต์ที่มีขนาดก้อนเล็ก แต่อาจมีปัญหาด้านการเคลื่อนตัวของวัสดุอื่นๆ ที่มีขนาดเล็กกว่าเข้าไปแทรกตัวอยู่ตามช่องว่างของก้อนยาง และทำให้เกิดปัญหาในการใช้งานได้ จึงควรมีการทดสอบคุณสมบัติดังกล่าวด้วย

#### 4. สรุป

การศึกษาการใช้เศษยางรถยนต์เก่าเป็นตัวกลางในชั้นระบายน้ำของระบบฝังกลบขยะ โดยการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ของตัวอย่างเศษยางรถยนต์เก่าที่ได้จากวิธีการตัดแตกต่างกัน ได้ตัวอย่าง 3 ลักษณะคือ แบบเส้นแบนกว้าง แบบเส้นแบนแคบ และแบบเป็นก้อน พบว่าตัวอย่างแบบเส้นแบนกว้างมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ต่ำที่สุดและตัวอย่างแบบเป็นก้อนมีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้สูงที่สุด โดยเศษยางรถยนต์เก่าแบบเส้นแบนกว้าง แบบเส้นแบนแคบ และแบบเป็นก้อน มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ในขณะที่ไม่มีหน่วยแรงกดทับเท่ากับ  $6.83 \times 10^{-4}$  เมตรต่อวินาที  $1.37 \times 10^{-3}$  เมตรต่อวินาที และ  $1.35 \times 10^{-3}$  เมตรต่อวินาที ตามลำดับ

การทดสอบเพื่อจำลองสถานะที่ตัวอย่างเศษยางรถยนต์เก่าถูกกดทับจากน้ำหนักของขยะและวัสดุปิดกลบในระบบฝังกลบขยะโดยเทียบเท่ากับน้ำหนักของชั้นขยะสูงถึง 10 เมตร คิดเป็นหน่วยแรงกดทับ 80 กิโลปาสกาล พบว่าตัวอย่างแบบเส้นแบนกว้างมีการยุบตัวมากที่สุด โดยมีระยะยุบตัวร้อยละ 35 และตัวอย่างแบบเป็นก้อนมีการยุบตัวน้อยที่สุด โดยมีระยะยุบตัวคิดเป็นร้อยละ 12 ตัวอย่างแบบเป็นก้อนมีการยุบตัวน้อยเนื่องจากมีรูปร่างที่เป็นก้อนมีความหนา จึงมีความแข็งแรงสามารถรับแรงได้ดี การหดตัวเสียดสีจึงเกิดขึ้นน้อย

การเพิ่มหน่วยแรงกดทับให้สูงขึ้นมีผลให้ตัวอย่างเศษยางรถยนต์เก่ามีการยุบตัวและมีอัตราส่วนช่องว่างลดลง ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ลดต่ำลงไปด้วย โดยตัวอย่างแบบเส้นแบนกว้าง แบบเส้นแบนแคบ และแบบเป็นก้อน มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ลดลงร้อยละ 88.7 ร้อยละ 74.8 และร้อยละ 26.3 ตามลำดับ ตัวอย่างที่มีความเหมาะสมในการใช้งานเป็นตัวกลางในชั้นระบายน้ำมากที่สุดคือ ตัวอย่างแบบเป็นก้อน เนื่องจากมี

ค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้สูงกว่า  $1 \times 10^{-4}$  เมตรต่อวินาที ตามเกณฑ์ที่กำหนดสำหรับวัสดุในชั้นระบายน้ำ และมีความแข็งแรง ด้านทานการยุบตัวและเสียดสีได้ดี จึงทำให้มีค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านได้ที่ค่อนข้างคงที่

#### กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ นายรัฐพงษ์ ฤทธิ์รุ่ง นายศราวุฒิ วงศ์แก้ว และนายสมเกียรติ บุญยิ่ง ในการทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการ และขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่ให้การสนับสนุนการศึกษาในครั้งนี้

#### เอกสารอ้างอิง

- [1] สถาบันพลาสติก (2561). *บทวิเคราะห์ ทิศทางอุตสาหกรรมยางล้อของไทย*. โครงการพัฒนาระบบฐานข้อมูลเชิงลึกอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ยางและไม้ยางพารา. (สืบค้นเมื่อ 21 พฤษภาคม 2563 <http://rubber.oie.go.th/Article.aspx?aid=55473>).
- [2] พงษ์ธร แซ่ฮุย (2555). เทคโนโลยีการใช้เศษยาง. *วารสารเทคโนโลยีวัสดุ*. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC), ฉบับที่ 67 ต.ค.-ธ.ค.2555, หน้า 40-50.
- [3] Federal Highway Administration (2008). *User Guidelines for Byproduct and Secondary Use Materials in Pavement Construction; Scrap Tires*. U.S. Department of Transportation, FHWA Publication Number: FHWA-RD-97-148. (สืบค้นเมื่อ 21 พฤษภาคม 2563 <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/97148/st1.cfm>).
- [4] Meegoda, J. N., Ezeldin, A. S., Fang, H.-Y. and Inyang, H. I. (2003). Waste Immobilization Technologies. *Practice Periodical of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste Management*; ASCE, 7(1), pp. 46-58.
- [5] Park, J. K., Edil, T. B., Kim, J. Y., Huh, M., Lee, S. H. and Lee, J. J. (2003). Suitability of Shredded Tyres as a Substitute for a Landfill Leachate Collection Medium. *Waste Management and Research*, 21(3), pp. 278-289.
- [6] Manassero, M., Benson, C. H. and Bouazza, A. (2000). Solid Waste Containment Systems. *GeoEng2000; International Conference on Geotechnical & Geological Engineering*, Melbourne, Australia.
- [7] USEPA. (1993). *Technical Manual: Solid Waste Disposal Facility Criteria*. EPA/530-R-93-017, Office of Solid Waste and Emergency Response, Washington, D.C.
- [8] ธเรศ ศรีสถิตย์ (2553). *วิศวกรรมการจัดการมูลฝอยชุมชน*. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 687 หน้า
- [9] Fetter, C. W. (1994). *Applied Hydrogeology*. New Jersey, Prentice Hall.